

地质通报

Geological Bulletin of China

ISSN 1671-2552, CN 11-4648/P

《地质通报》网络首发论文

题目：兰坪金顶超大型铅锌矿田深部地质结构与成矿潜力：来自综合地球物理探测的约束

作者：薛力鹏，Rehana Ghazi，刘靖坤，于常青，杨天南，薛传东

网络首发日期：2025-08-20

引用格式：薛力鹏，Rehana Ghazi，刘靖坤，于常青，杨天南，薛传东. 兰坪金顶超大型铅锌矿田深部地质结构与成矿潜力：来自综合地球物理探测的约束[J/OL]. 地质通报. <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250820.0839.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

兰坪金顶超大型铅锌矿田深部地质结构与成矿潜力：来自综合地球物理探测的约束

薛力鹏^{1,2}, Rehana Ghazi^{1,2}, 刘靖坤^{1,2}, 于常青³, 杨天南³, 薛传东^{1,2*}

(1.昆明理工大学地球科学系, 云南 昆明 650093; 2. 兰坪金顶铅锌矿盆地—油气流体成矿云南省野外科学观测研究站, 云南 兰坪 671400; 3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要：【研究目的】滇西北金顶超大型铅锌矿田位于青藏高原东南缘兰坪中—新生代盆地的中部，受印度—欧亚大陆斜向碰撞造山有关构造转换的影响，深浅部地壳物质经历多期次的构造变形而相互叠加。本文旨在解析矿田深部地质结构，明确找矿潜力和深部勘探方向。【研究方法】利用穿越金顶矿田内北厂和跑马坪矿床的2条音频大地电磁法(AMT)和重力勘探剖面测量，借助地表构造填图数据和已有勘查钻孔约束的地层岩性界面，综合解译矿田地层格架及其与断层的配置关系，厘定其深部地质结构。【研究结果】受到新生代以来EW向地壳缩短变形的影响，区内大量基底岩系和盆地充填地层沿近SN向逆断层和(或)近EW向走滑—掀斜断层发生变形和相互叠加，导致上三叠统三合洞组(T_{3s})和麦初箐组(T_{3m})、白垩系景星组(K_{1j})和南新组(K_{2n})及古近系始新统云龙—果朗组(E_{1y+g})沿断面逆冲到新近系中新统金顶群(N_{1j})之上，从而形成了控矿地质结构。【结论】圈定了11处深部找矿靶区，认为金顶矿田深部具备较好的找矿潜力。

关键词 深部地质结构；音频大地电磁法；重力勘探；找矿靶区；金顶铅锌矿田；兰坪盆地

创新点：厘定出金顶超大型铅锌矿田深部地质结构，圈定了11处深部找矿靶区。

Deep geological architecture and prospecting potential of the giant Jinding Zn–Pb ore field, SE Tibetan Plateau: Constraints from integrated geophysical data

XUE Lipeng^{1,2}, Rehana Ghazi^{1,2}, LIU Jingkun^{1,2}, YU Changqing³, YANG Tiannan³, XUE Chuandong^{1,2*}

(1. Department of Earth Sciences, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2. Observation and Research Station of Basin Brine and Petroliferous Fluid Coupling and Metallogeny at the Jinding Zinc–Lead Deposit in Lanping, Yunnan, Lanping 671400, Yunnan, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: [Objective] The giant Jinding Zn–Pb ore field is located in central part of the Meso–Cenozoic Lanping Basin in northwestern Yunnan Province, SE Tibetan Plateau. It is affected by the tectonic transition owing to the Indo–Eurasia oblique collisional processes. The deep and shallow crustal materials undergo multi-stage structural deformation and overlap. This paper aims to analyze the deep geological structure of the ore field, clarify prospecting potential of the ore field. [Methods] The surface geological structure mapping data, lithological interface constraints from the exploration boreholes and interpreted data from the two Audio-Frequency Magnetotelluric (AMT) and gravity exploration (GEP) profiles that simultaneously traversing the Beichang and Paomaping ore deposits, were integrated to clarify the stratigraphic framework of the mine field and its relationship with faults, and define the deep geological architecture. [Results] Affected by regional east–west crustal shortening and deformation since the Cenozoic, numerous basal and filling stratum have undergone deformation and superimposition along the nearly S–N-trending thrust fault and/or nearly E–W-trending tilting tear fault, which caused the Upper Triassic Sanhedong and Maichuqing formations (T_{3s}, and T_{3m}),

收稿日期：2025-01-14；修订日期：2025-07-10

资助项目：云南省新一轮找矿战略行动计划项目(Y202405)，国家重点研发计划课题(2016YFC06003, 2021QZKK0301)，国家自然科学基金项目(U09933605, 42163007, 41373049)和中国地质调查局地质调查项目(编号：1212011121065, 1212011020000150011)

作者简介：薛力鹏（1980—），男，博士研究生，矿产普查与勘探专业。E-mail: 37911566@qq.com

*通信作者：薛传东（1971—），男，博士，教授，从事矿床地质与区域成矿学的教学与科研工作。E-mail: xuechuandong@kust.edu.cn

the Cretaceous Jingxing and Nanxin formations (K_{1j} and K_{2n}), and the Paleocene Yunlong–Guolang Formation (E_{1y+g}) to thrust over the Miocene Jinding Group (N_{1j}) along the fault plane, thus forming the controlling mineralization geological structure. **[Conclusions]** Eleven deep prospecting targets are delimited and it is considered that there is a good mineral prospecting potential in the deep part of the Jinding orefield.

Key words: deep geological structure; audio–frequency magnetotelluric method; gravity exploration; prospecting target; Jinding Zn–Pb ore field; Meso–Cenozoic Lanping Basin

Highlights: The deep geological structure of the Jinding super large lead-zinc ore field is clarified, and 11 deep mineral prospecting targets are delineated.

About the first author: Xue Lipeng, male, born in 1980, Ph.D candidate, mainly engaged in mineral prospecting and exploration. E-mail: 37911566@qq.com

About the corresponding author: Xue Chuandong, male, born in 1971, Ph.D, professor, mainly engaged in teaching and research on ore deposit geology and regional metallogeny. E-mail: xuechuandong@kust.edu.cn

Fund support: Supported by the project of Yunnan Province New Round Mineral Exploration Strategic Action Project (No. Y202405); National Key Research and Development Program of China (Nos. 2016YFC06003, 2021QZKK0301); National Natural Science Foundation of China (Nos. U09933605, 42163007, 41373049); China Geological Survey (CGS) Projects (Nos. 1212011121065, 1212011020000150011)

滇西北金顶超大型铅锌矿田的沉积岩容矿、构造控矿及盆地流体成矿特点显著。自发现、勘探和开采持续至今已 60 多年来,前人先后从矿床地质(白嘉芬等, 1985; Kyle and Li, 2002; 王安建等, 2007; 高兰等, 2008; 刘俊来等, 2009; 余静等, 2017; Leach et al., 2017; Liang et al., 2022; 王宇等, 2022)、矿床地球化学(Xue et al., 2003, 2006, 2015; Tang et al., 2014; Yalikun et al., 2018a; Lan et al., 2021)等角度开展过诸多研究,认为矿床形成于晚渐新世–早中新世(李小明等, 2000; Wang et al., 2009; Yalikun et al., 2018b; Huang et al., 2022; 王宇等, 2022)。而兰坪盆地的新生代演化过程受印度–欧亚大陆斜向碰撞造山有关构造转换的影响,深浅部地壳物质经历多期次的构造变形而相互叠加(宋玉财等, 2017; Song et al., 2019; Liang et al., 2022),这就导致对矿田地质结构、控矿构造及成矿时代争议不断,限制了对成矿作用的合理理解(杨天南和薛传东, 2022)。金顶矿田随着多年的大规模露天开采,浅部资源状况被充分揭露,地质关系和矿化特征逐渐明晰,但其深部地质结构、控矿构造与找矿方向仍不清楚,制约了深边部资源增储和找矿发现。

地球物理探测技术因其穿透深度大,能客观反映深部构造和隐伏地质体的特性,被广泛应用于研究深部圈层地质结构和发现隐伏矿化空间(强建科等, 2014; 周道卿等, 2015; 丁文祥等, 2018; 孟银生等, 2022; 徐盛林等, 2024)。金顶矿田内不同地质体之间存在明显的物性参数(如电阻率、密度)差异,为有效解读深部地质结构和控矿构造提供了地球物理探测前提条件。已开展的地球物理探测研究(林家勇, 2011; 周道卿等, 2015; 王冠, 2021),多是注重探测数据本身的解译或不同探测方法的有效性比较,以及深部隐伏岩体的探测(周道卿等, 2015)。但缺乏对金顶矿田深部地质结构及隐伏矿化空间定位研究,从而制约对成矿作用的认识和深部找矿。

为此,本文在野外地质调查和勘查钻孔及坑道编录资料重新梳理基础上,以勘探程度较高、代表性较强的北厂和跑马坪矿床为主要研究对象,分别布设从西向东穿越北厂矿床北部(露天采场以北)、跑马坪矿床中部(L02 线)和由南西向北东切穿北厂矿床东部(斜穿露天采场东南部)和跑马坪矿床中部(L04 线)(图 1)的 2 条音频大地电磁剖面。同时,为了了解整个矿集区区域构造、深部岩体分布,本次还开展了重力扫面工作(数据用于三维重力反演)。为了提高物探数据解译的可靠性,在获取三维重力反演数据体后,我们在电磁勘探位置(L02 线和 L04 线)分别进行重力数据抽取,得到相应重力勘探剖面(图 3-b 和图 4-b)。以此深入厘定金顶矿田深部地质结构,并总结控矿要素,提出深边部找矿靶区,为金顶铅锌矿田及邻区类似矿床的找矿预测和勘查增储提供新的依据。其中,1.0 km 以浅范围主要依据钻孔(部分钻探孔深接近 1 km)和地质观

测数据，中深部则利用 2 条瞬变电磁探测（AMT）和重力测量数据进行综合解译。

1 地质背景

金顶铅锌矿田位于青藏高原东南缘兰坪中-新生代盆地中部（图 1-a, b），晚二叠世至上新世期间的沉积岩系构成了盆地的主体岩石组合（图 1-c、图 2）。其基底岩系由下部的晚二叠世-中三叠世陆缘弧火山岩夹碳酸盐岩及碎屑岩和上部的上三叠统海陆交互碎屑岩及海相碳酸盐岩夹砂岩构成；其上还依次充填了中-新生代陆源碎屑岩（梁明娟, 2016; Liang et al., 2022）。

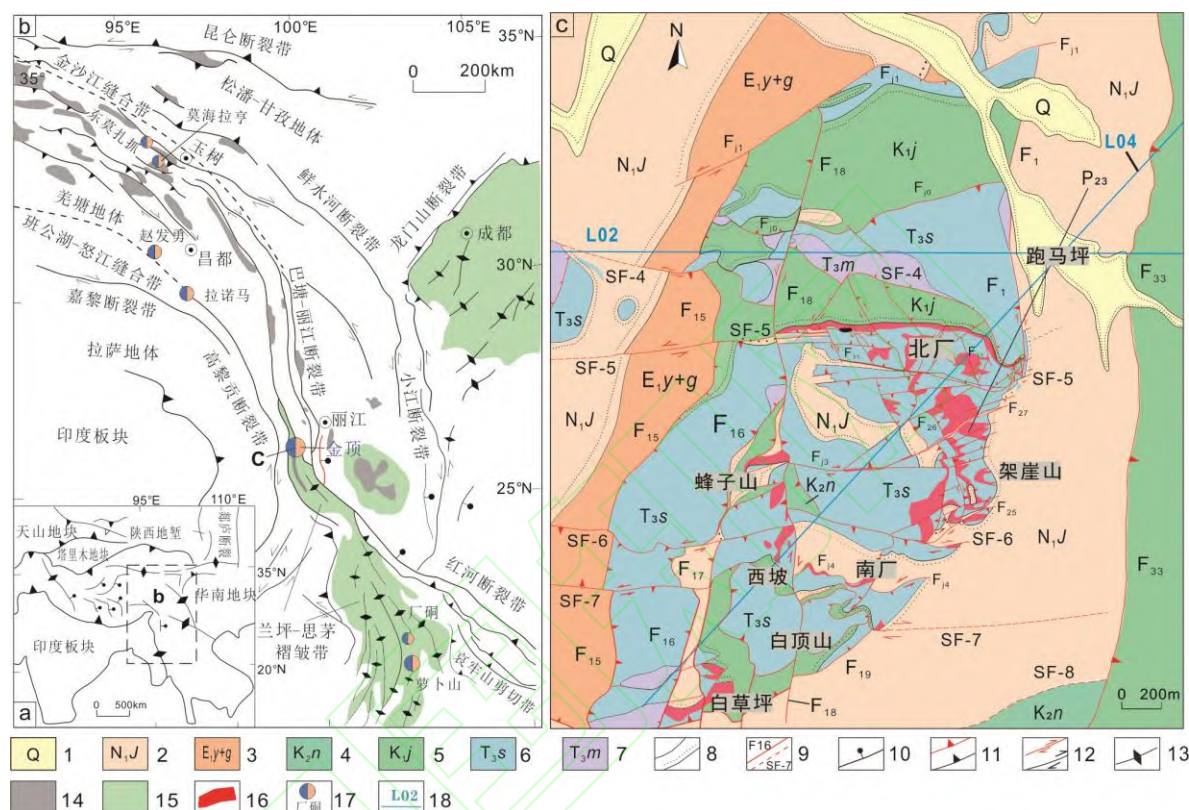


图 1 三江构造带区域构造 (a, b) 和金顶铅锌矿田 (c) 地质略图

Fig.1 Sketch tectonic map of the Sanjiang tectonic belt (a,b) and Geologic map of Jinding Zn-Pb Ore Field (c)
 1—第四系；2—新近系中新统金顶群；3—古近系始新统云-果朗组；4—上白垩统南新组；5—下白垩统景星组；6—上三叠统三合洞组；7—上三叠统麦初箐组；8—整合/不整合地质界线；9—实测/推测断层及编号；10—正断层；11—逆冲断层；12—走滑断层；13—褶皱带；14—古新统—中新统盆地；15—中生代盆地；16—铅锌矿体；17—铅锌矿床及名称；18—物探剖面
 1—Quaternary; 2—Miocene Jinding Group of the Neogene System; 3—Eocene Yunlong-Guo Lang Formation of the Paleogene System; 4—Upper Cretaceous Nanxin Formation; 5—Lower Cretaceous Jingxing Formation; 6—Upper Triassic Sanhedong Formation; 7—Upper Triassic Maichuqing Formation; 8—Conformity/Unconformity line; 9—Observed fault/Inferred fault; 10—Normal fault; 11—Thrust fault; 12—Strike-slip fault; 13—Fold belt; 14—Paleocene-Miocene Basin; 15—Mesozoic Basin; 16—Lead-zinc ore body; 17—Lead-zinc deposit; 18—Geophysical profile

金顶矿田出露地层及岩性组合（Liang et al., 2022; 王宇等, 2022; 杨天南和薛传东, 2022）由老至新依次为上三叠统麦初箐组(T₃m)、三合洞组(T₃s)，下白垩统景星组(K₁j)，上白垩统南新组(K₂n)，古近系始新统云-果朗组(E₁y+g)，新近系中新统金顶群(N₁J)及第四系(Q)残坡积和冲洪积物（图 1-c、图 2）。

兰坪盆地受新生代印度-欧亚大陆斜向碰撞造山过程的持续挤压作用，发育多期的地壳收缩和变形事件。受此影响，金顶矿田内断裂及褶皱构造组合发育，具体表现为大型开阔褶皱和近 SN 向逆断层+近 EW 向走滑-掀斜断层的组合（杨天南和薛传东, 2022），还发育许多 NEE 向和 NNW 向次级断层。地质调查和矿化定位特征（图 2）显示，区内铅锌矿化普遍集中在沿断层面逆冲于金顶群砂泥岩之上的三合洞组，说明成矿事件与金顶群沉积同期或稍晚。结合前人对成矿时代的限定（Yalikun et al., 2018b; Huang et al., 2020），表明始于晚渐新世-早中新世（23±2 Ma）的近

SN 向逆断层和近 EW 向走滑-掀斜断层组合与区内铅锌大规模成矿作用关系密切。

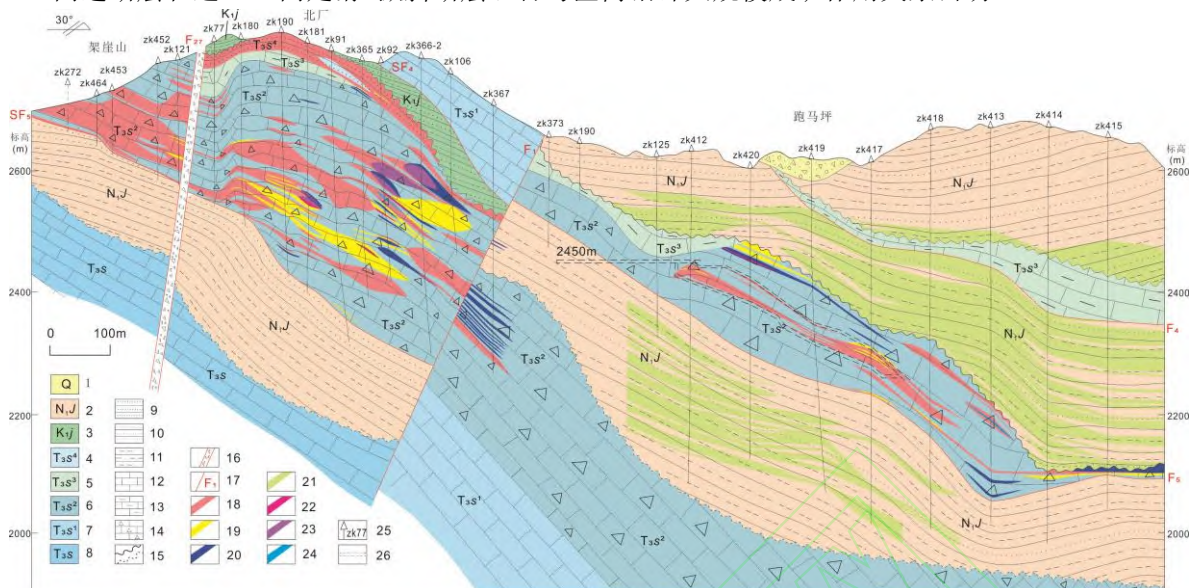


图 2 金顶矿田架崖山-北厂-跑马坪 P23 勘探剖面 (钻孔资料据云南金鼎锌业有限公司, 2020)

Fig.2 P23 Exploration Profile cross the Jiayashan-Beichang-Paomaping ore deposits in the Jinding Zn-Pb ore field (The drillhole data is after the Yunnan Jinding Zinc Industry Co., Ltd, 2020)

1—第四系；2—新近系中新统金顶群；3—下白垩统景星组；4—上三叠统三合洞组第四段；5—三合洞组第三段；6—三合洞组第二段；7—三合洞组第一段；8—上三叠统三合洞组；9—砂岩；10—粉砂岩；11—砂质泥岩；12—灰岩；13—泥灰岩；14—角砾灰岩；15—不整合/推测不整合界线；16—断层破碎带；17—断层及编号；18—铅锌矿体；19—黄铁矿体；20—天青石矿体；21—石膏矿体；22—黄铁矿、天青石矿共生矿体；23 铅锌矿、天青石共生矿体；24—黄铁矿、铅锌矿、天青石共生矿体；25—已施工钻孔；26—已施工坑道

1—Quaternary; 2—Miocene Jinding Group of the Neogene System; 3—Lower Cretaceous Jingxing Formation; 4—Upper Triassic Sanhedong Formation Member 4; 5—Upper Triassic Sanhedong Formation Member 3; 6—Upper Triassic Sanhedong Formation Member 2; 7—Upper Triassic Sanhedong Formation Member 1; 8—Upper Triassic Sanhedong Formation; 9—Sandstone; 10—Siltstone; 11—Sandy mudstone; 12—Limestone; 13—Argillaceous limestone; 14—Brecciated limestone; 15—Unconformity/inferred unconformity line; 16—Fault zone; 17—Fault; 18—Lead-zinc orebody; 19—Pyrite orebody; 20—Celestite orebody; 21—Gypsum orebody; 22—Pyrite-celestite associated orebody; 23—Lead-zinc-celestite associated orebody; 24—Pyrite-lead-zinc-celestite polymetallic orebody; 25—Drilled borehole; 26—Excavated adit

2 研究方法和岩矿石物性特征

2.1 地质调查与勘探资料处理

金顶矿田地表的地质界线、断层产状和矿化位置等数据来自课题组前期开展的矿区大比例尺地质填图成果，与之对应的深部数据来自勘查钻孔。根据地质规律，由已知到未知并按趋势向深部逐渐延伸，得到控制程度较高的不同地质体界线或断层。把这些控制程度较高的地质体界线和断层与利用物探数据反演得到的对应地质体界线和断层对比，找出差异性和变化规律，从而增加综合地质解译的可靠性。对于矿田深部无勘查钻孔控制的区域，主要依据地质调查认识和物探数据联合推测来限定。

2.2 音频大地电磁测深法

音频大地电磁测深(AMT) 是在大地电磁法(MT)基础上发展而来的一种被动源电磁探测手段，主要通过改变频率方式在地表测量正交电场、磁场分量的扰动值，分析目标地质体的电性结构信息。本次工作开展时间为2019年，野外数据采集平台来自加拿大凤凰公司制造的5台MTU-5A系列仪器和4根型号为MTC-150磁棒。野外测量采用多尺度大地电磁布极方式，每一排5台仪器，中间一台仪器张量布设，其余仪器标量布设，电极首尾相连；每个排列采集9个点数据，点距50m；采集频率统一使用1~104 Hz，GPS加罗盘确定测点定位。数据采集结束后，将野外采集的时间序列文件转换为互功率谱文件，之后对功率谱文件进行编辑，剔除受干扰、信噪比低的功率谱文件，进一步提高资料质量。同时，对数据进行圆滑处理、静态位移校正、TE与TM模式识别等操作，消除地表局部电性不均匀造成的影响，剔除异常频点，尽可能地保留地质体反应

的真实信息。

本次主要采用尖锐边界反演和共轭梯度两种反演算法，尖锐边界反演对构造反应灵敏，增强横向与纵向分辨力，先进尖锐边界反演，利用其反演成果作为共轭梯度算法的初始模型，再进行人机交互层状介质共轭梯度法（Rodi and Mackie, 2001）反演。

2.3 重力勘探

因地质构造及矿产资源的密度质量分布不均匀因素可引起重力异常的特征，重力探测在矿产勘查中常被用来识别地质体的密度变化，并圈定断裂、隐伏岩体及间接找矿。本次野外重力观测仪器型号分别 LCR-D 型和 Burris 型，野外观测前后严格开展仪器性能试验，依次进行格值标定，纵-横水泡位置与光线灵敏度调节与测定、动-静态试验、一致性观测及测量精度对比。观测采用基点→测点→基点顺序进行观测，基点 3 次读数，两基点观测时间差均为 10 min。测点和检查点均采用了两次读数观测方式进行，两次读数间误差≤0.005 格。各项野外观测读数时间取至分钟，改正、布格重力异常值、精度统计均取至 $0.001 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^2$ 。本次工作网度 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ ，坐标点总数 3000 个。

对于野外采集的原始重力数据，首先进行校正处理，通过固体潮校正、零点掉格校正、布格校正、正常场校正和地形校正，就可得到初始布格重力异常数据。然后，采用克里格法对其进行网格化处理，然后对网格化数据进行低通滤波，消去随机干扰得到最终布格重力异常数据。综合分析研究区地层的厚度及埋深情况后，将布格重力异常减去区域背景场，即可获得剩余重力异常。

2.4 地球物理特征-物性特征

本次在金顶矿田及外围地区内 40 处，共采集 286 件不同岩矿石样品进行物性参数测定，统计结果见表 1。结果显示：不同地层、岩矿石的物性层间存在较好电性、密度差异。其中，矿石与围岩密度差异较为明显，含矿岩石密度较围岩大（密度差 0.3 g/cm^3 ）；块状硫化矿电性特征通常表现出高极化、低电阻反应特征；但泥岩、砂质泥岩（尤其是金顶群）及泥质粉砂岩能对电阻率反应结果形成干扰因素。上述物性分析表明，金顶矿田适合实施音频大地电磁测深和重力勘探方法进行地球物理测量，其反演结果可支持对深部地质结构的解译和约束。

表 1 金顶矿田岩（矿）石物性参数统计表

岩(矿)石名称	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot \text{m})$		极化率 $\eta/\%$		密度 $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	
	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值
硫化矿	10~200	60	3.17~6.43	4.83	3.130~4.065	3.659
锌铅氧化石英砂岩	1200~1700	1527	2.21~4.16	3.16	2.576~3.56	3.440
灰岩	840~17560	>2000	0.31~1.53	1.24	2.43~2.675	2.655
砂岩	150~450	300	0.21~0.83	0.75	2.27~3.73	2.522
石英砂岩	220~810	412	0.3~0.86	0.76		
粉砂岩、细砂岩	130~430	235	0.24~0.75	0.69		
泥质粉砂岩	110~350	202	0.27~0.97	0.63		
泥岩	30~400	110	0.21~0.83	0.67		
砂质泥岩	45~196	80	0.42~0.87	0.71		

3 勘查结果

本次用于约束金顶矿田深部地质结构的物探数据，分别来自 2 条音频大地电磁测深和重力勘探剖面测线。其中重力剖面是在开展重力扫面工作（数据用于三维重力反演）基础上，获取了三维重力反演数据体后，笔者在开展的音频大地电磁测深位置（L02 线和 L04 线）分别进行重力数据抽取，人机交互后得到相应重力勘探剖面（图 3-b、图 4-b）。需要说明的是，由于矿区大量发育厚层且富含石膏的金顶群砂泥岩带来的体积效应影响和大量采空区回填、矿石堆放等干扰因素（尤其是北厂矿床），本次综合地质解译是以电阻率差异和钻孔控制的岩性界面为主要约束依据，重力勘探数据只用来辅助约束。

3.1 地层结构的深部分布特征

3.1.1 L02 线

图 3-c 为 L02 线实测音频大地电磁 (AMT) 二维反演结果。结果表明,地质体的电性层状特征明显,并呈现上低(阻)下高(阻)的变化趋势。其中,跑马坪至北厂矿床及以西地段,地表以下约 1.5 km 深度范围普遍呈低阻($\leq 150 \Omega \cdot m$)特点,局部范围呈中阻,并呈现韵律性起伏变化;大于 1.5 km 深度开始呈中高阻($> 200 \Omega \cdot m$)特点,且表现出稳步升高趋势。而跑马坪矿床以东地段,由浅部至深部电阻率总体呈现由中低阻向高阻逐步过渡的趋势,地表以下约 700 m 深度范围内普遍具中低阻($< 200 \Omega \cdot m$)特点,局部范围为低阻;大于 700 m 深度主要呈现中高阻($200 \sim 400 \Omega \cdot m$)和高阻($> 400 \Omega \cdot m$)特点。

L02 线已施工多个孔深大于 500 m 的钻孔,其中 ZK302 最深为 956 m。据电阻率差异和已有钻孔揭露的岩性界面数据,约束了北厂和跑马坪矿床的地层结构。其中,北厂矿床识别和划分出 5 个地层(图 3-b~d),麦初箐组和三合洞组在不同深度重复出现;而跑马坪矿床识别和划分出 4 个地层(图 3-b~d),金顶群和三合洞组在不同深度重复出现。具体推断解译结果如下:

北厂矿床的地层结构(图 3-d)由地表至深部依次为:①麦初箐组(T_{3m}),呈现中高阻反应,据钻孔揭露该岩性段为泥质粉砂岩,与电阻率反应及重力反演结果可对应。②景星组(K_J),为低阻反应,钻孔揭露该岩性段为泥质及泥质粉砂岩。据表 1 可知,电阻率反应结果与实际岩性基本对应,但明显对矿化电阻率反应形成干扰。该层重力反演结果与实际岩性存在偏差,综合判断应以钻孔揭露和电法反应为主要依据。③三合洞组(T_{3s}),该层电阻率呈低阻反应。据钻孔揭露可知,其低阻反应主要为块状硫化矿所致,电阻率反应、重力反应结果与实际相符。④金顶群(N_1J),电阻率呈中低阻反应,结合地质认识推断该层应为金顶群砂泥岩。重力异常表现为弱正异常(矿化)反应,推测可能是由天青石矿化体发育所致,需进一步验证。⑤三合洞组(T_{3s}),普遍呈低阻反应,结合地质认识和重力反应结果,其低阻反应和重力异常可能与块状硫化物矿化发育所致。⑥麦初箐组(T_{3m}),普遍具中高阻反应,结合地质认识,推断该层为麦初箐组砂泥岩,其重力反应结果与推断结果也吻合。⑦攀天阁组(T_{1-2p}),为厚大的火山岩建造。区域调查结果(梁明绢, 2016; Liang et al., 2022)显示,下-中三叠统攀天阁组(T_{1-2p})火山岩广泛分布于兰坪盆地的东、西缘边缘,构成盆地的间接基底岩系。结合前人地球物理研究(周道卿等, 2015)、地质认识和电性特征推断,该层为隐伏火山岩,连体成片下伏于麦初箐组之下。

可见,北厂矿床的地层结构(图 3-d)由浅至深表现为:顶部麦初箐组与其下景星组呈断层接触;浅部景星组与三合洞组呈不整合接触;中深部金顶群与上覆三合洞组呈断层接触,与下伏三合洞组呈不整合接触;深部麦初箐组与上覆三合洞组为连续沉积,并不整合上覆于攀天阁组火山岩上。

(2)跑马坪矿床由地表至深部的地层结构依次为(图 3-d):①金顶群(N_1J),呈低阻反应,据钻孔揭露可知本段岩性为砂泥岩,且发育石膏,电阻率及重力反应与实际岩性可对应。②三合洞组(T_{3s}),呈低阻反应。据钻孔揭露可知,其低阻反应应为块状铅锌硫化物矿体所致,电阻率反应结果与实际相符,但重力反应与实际不符。推测是由其上覆和下伏较厚的金顶群砂泥岩及其内富含石膏所致。③金顶群(N_1J)砂泥,呈中低阻反应。结合钻孔揭露资料看,该层为金顶群砂泥岩,重力负异常应为石膏层发育所致。④三合洞组(T_{3s}),呈低阻反应。从图 2 可知,跑马坪矿床中深部金顶群砂泥岩之下普遍产有三合洞组(见 ZK367),且其内矿化较普遍,推断该层为三合洞组,低阻反应为矿化发育所致。而其重力弱负异常可能为其上覆和下伏厚度较大的金顶群砂泥岩及富含石膏的体积效应所致。⑤麦初箐组(T_{3m}),普遍中高阻反应,结合地质认识,推断该层为麦初箐组砂泥岩,其重力反应结果与推断结果也基本对应。⑥攀天阁组(T_{1-2p}),推断该层为隐伏的火山岩。

由此,跑马坪矿床地层结构(图 3-d)由浅至深表现为:浅部三合洞组与上覆金顶群(顶部)呈不整合接触,与下伏金顶群呈断层接触;中深部三合洞组与上覆金顶群(中部)呈不整合接触;深部麦初箐组与上覆三合洞组(下部)呈整合接触,其下伏岩层为攀天阁组火山岩。

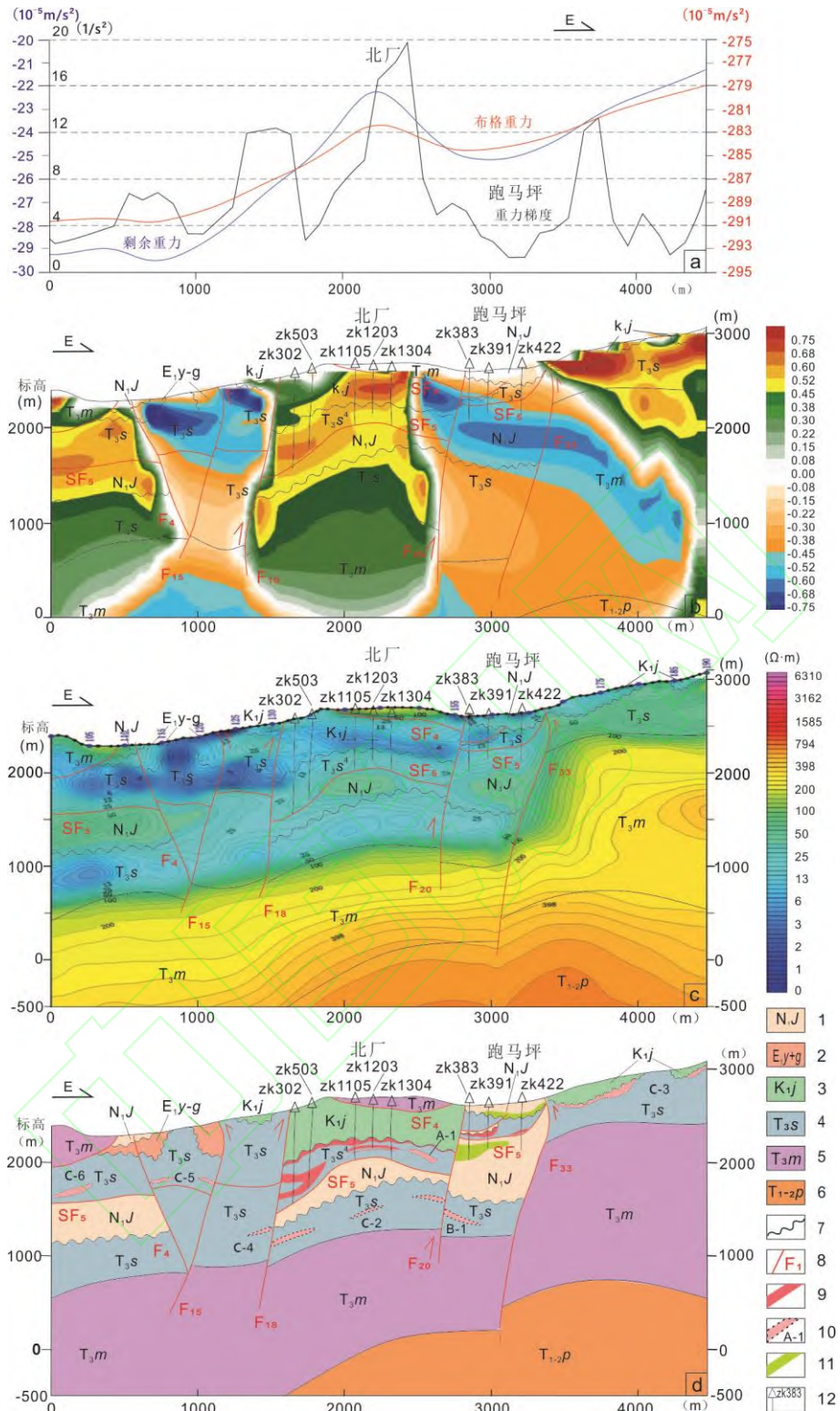


图3 L02 线物探解译剖面及综合地质剖面图

Fig.3 L02 Geophysical Interpretation Profile and Comprehensive Geological Profile

a—水平重力梯度及曲线图; b—人机交互重力剖面图; c—AMT 二维连续介质反演剖面图 (电阻率断面); d—综合地质解译剖面图
1—新近系中新统金顶群; 2—古近系始新统云龙-果朗组; 3—下白垩统景星组; 4—上三叠统三合洞组; 5—上三叠统麦初箐组;
6—早-中三叠世攀天阁组火山岩; 7—不整合地质界线; 8—断层及编号; 9—铅锌矿体; 10—找矿靶区及编号; 11—石膏矿体;
12—已施工钻孔

a—Horizontal gravity gradients and curve chart; b—Human-machine interaction gravity profile; c—AMT 2D continuous medium inversion profile (resistivity profile); d—Comprehensive geological interpretation profile map

1—Miocene Jinding Group of the Neogene System; 2—Eocene Yunlong-Guo Lang Formation of the Paleogene System; 3—Lower Cretaceous Jingxing Formation; 4—Upper Triassic Sanhedong Formation; 5—Upper Triassic Maichuqing Formation; 6— Early-Middle Triassic Piantiange Formation Volcanic Rocks; 7—Unconformity line; 8—Fault; 9—Lead-zinc ore body; 10—Prospecting target area;

11—Gypsum ore body; 12—Drilled borehole

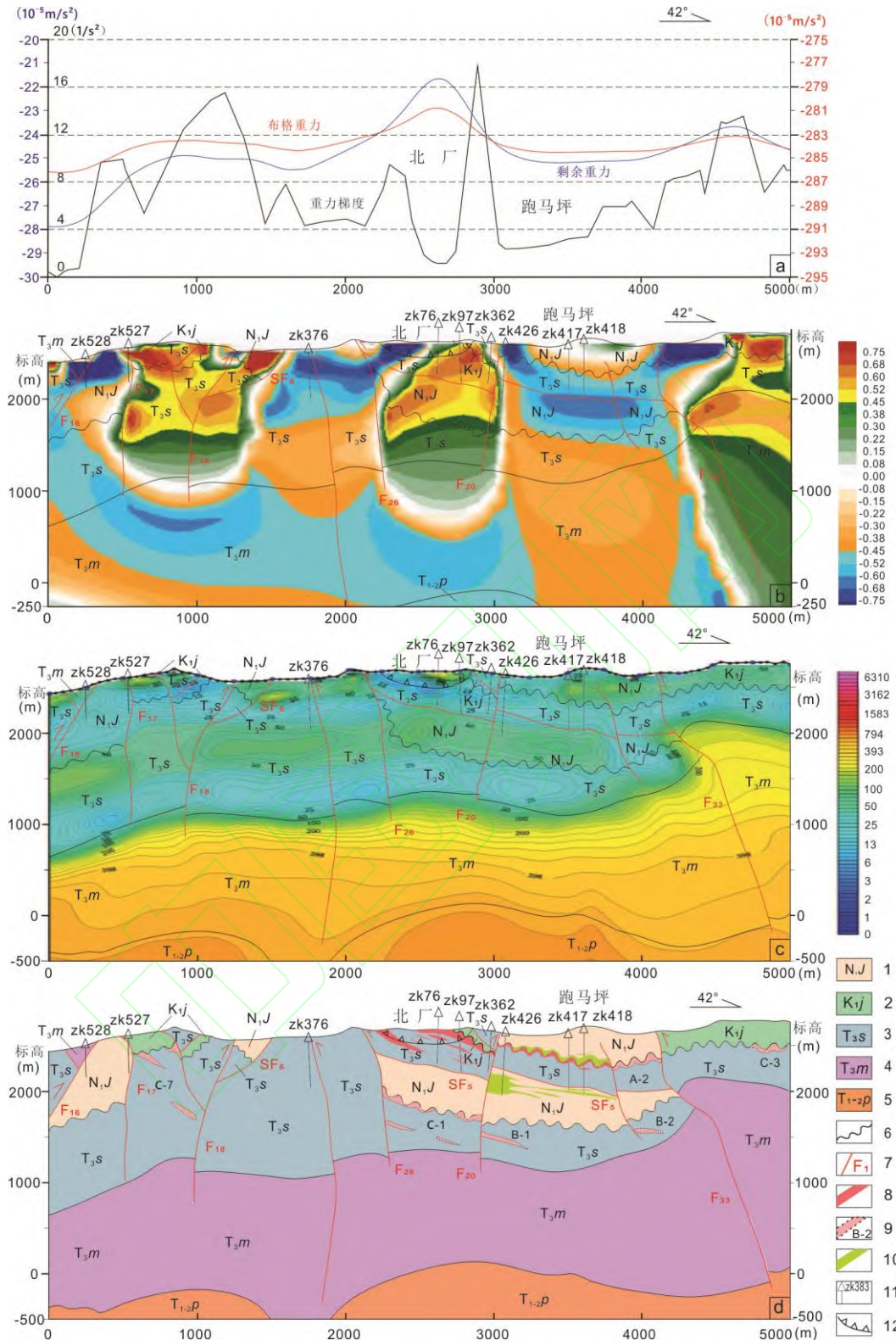


图 4 L04 线物探解译剖面及综合地质剖面图

Fig.4 L04 Geophysical Interpretation Profile and Comprehensive Geological Profile

a—水平重力梯度及曲线图; b—人机交互重力剖面图; c—AMT 二维连续介质反演剖面图 (电阻率断面); d—综合地质解译剖面
1—新近系中新统金顶群; 2—下白垩统景星组; 3—上三叠统三合洞组; 4—上三叠统麦初箐组; 5—早-中三叠世攀天阁组火山岩; 6—不整合地质界线; 7—断层及编号; 8—铅锌矿体; 9—找靶区及编号; 10—石膏矿体; 11—已施工钻孔; 12—采空区
边界线

a—Horizontal gravity gradients and curve chart ;b—Human-machine interaction gravity profile; c—AMT 2D continuous medium inversion profile (resistivity profile);d—Comprehensive geological interpretation profile map.

1—Miocene Jinding Group of the Neogene System; 2—Lower Cretaceous Jingxing Formation; 3—Upper Triassic Sanhedong Formation; 4—Upper Triassic Maichuqing Formation; 5—Early-Middle Triassic Piantiange Formation Volcanic Rocks; 6—Unconformity line; 7—Fault; 8—Lead-zinc ore body; 9—Prospecting target area; 10—Gypsum ore body; 11—Drilled borehole; 12—Mined-out area boundary

3.1.2 L04 线

L04 线上已施工多个深孔, 其中 ZK426 最深达 701.56 m (图 4-d)。图 4-c 为 L04 线实测音频大地电磁 (AMT) 二维反演结果, 其与 L02 线电法特征相似, 也显示出明显的层状电性特征。总体上看, 跑马坪至北厂、西坡矿床及其西南区域, 电阻反应特征类似, 但跑马坪矿床东北部的外围区域, 其电阻反应特征与跑马坪、北厂矿床有所不同。其中, 跑马坪至北厂、西坡矿床及其西南区域, 在地表以下深约 1.5 km 范围内普遍呈中低阻 ($\leq 250 \Omega \cdot m$) 反应, 并呈现低-中-低的变化趋势; 大于 1.5 km 深度开始呈中高阻 ($> 250 \Omega \cdot m$) 反应, 并呈现稳步升高趋势, 深约 2.0 km 处开始出现高阻反应。而跑马坪矿床东北部的区域, 地表以下深约 750 m 范围内普遍呈低阻 ($\leq 100 \Omega \cdot m$) 反应, 由浅至深电阻率呈现降低的趋势; 大于 750m 深度呈现中高阻 ($200 \sim 500 \Omega \cdot m$) 向高阻 ($> 500 \Omega \cdot m$) 逐渐过渡反应趋势。

L04 线上, 北厂矿床识别和划分出 5 个地层 (图 4-b~d), 其中三合洞组重复出现; 跑马坪矿床识别和划分出 4 个地层 (图 4-b~d), 且金顶群和三合洞组交替重复出现。具体推断解译结果如下:

(1) 北厂矿床由地表至深部、由北东往南西 (图 4-b~d 中 ZK362 至 ZK376 方向) 地层结构依次表现为: ①三合洞组 (T_{3s}), 据钻孔揭露该岩性段为三合洞组泥灰岩、角砾灰岩, 其低阻率反应应为干扰因素所致。②景星组 (K_{1j}), 据钻孔揭露该岩性段为泥质及泥质粉砂岩, 但难以判定其低阻率是其本身岩性反应还是干扰因素所致。③三合洞组 (T_{3s}), 据钻孔揭露该岩性段为三合洞组, 其内发育大量砂岩型铅锌硫化物矿体 (图 2、图 4-d)。但因上部多为采空区, 无法判定低阻率反应是否为铅锌矿化所致。④金顶群 (N_{1j}), 呈中低电阻率反应, 结果可与实际岩性相对应。⑤三合洞组 (T_{3s}), 多呈低阻局部呈中低阻反应。结合重力反应, 推断该段为三合洞组, 其低阻反应可能与铅锌矿化有关。⑥麦初箐组 (T_{3m}), 该层普遍为中高阻反应, 结合地质认识, 推断该层为麦初箐组。⑦攀天阁组 (T_{1-2p}), 推断该层为隐伏的火山岩。

因而, 北厂矿床的地层结构由浅至深表现为: 顶部三合洞组与其下伏景星组呈断层接触; 浅部景星组与三合洞组为不整合接触; 中深部金顶群与上覆三合洞组呈断层接触, 与下伏三合洞组呈不整合接触; 深部麦初箐组与上覆三合洞组呈整合接触, 其下有厚大的攀天阁组火山岩。

(2) 跑马坪矿床为全隐伏矿床, 由地表至深部地层结构依次表现为: ①金顶群 (N_{1j}), 在西南段为低阻反应, 东北段多呈中低阻反应, 局部呈高阻反应。可与钻孔揭露实际岩性对比。②三合洞组 (T_{3s}), 普遍呈低阻反应。可钻孔揭露实际岩性及矿化对比。此外, 该层与 L02 线上情况相似, 重力反应与实际不符, 推测可能是由其上覆和下伏较厚的金顶群砂泥岩及其内富含石膏所致。③金顶群 (N_{1j}), 普遍呈低阻反应。与钻孔揭露的实际岩性段相符, 重力负异常应为富含石膏所致。④三合洞组 (T_{3s}), 普遍呈低阻反应, 结合地质认识, 推断该层为三合洞组, 低阻反应可能与铅锌硫化物矿体有关, 而重力弱负异常可能为其上覆和下伏厚大的金顶群砂泥岩及富含石膏的体积效应所致。⑤麦初箐组 (T_{3m}), 普遍中高阻反应, 推断该层为麦初箐组。⑥攀天阁组 (T_{1-2p}), 推断该层为厚大的隐伏火山岩。

由此, 跑马坪矿床地层结构由浅至深表现为: 浅部三合洞组与上覆金顶群 (顶部) 呈不整合接触, 与下伏金顶群则呈断层接触; 中深部三合洞组与上覆金顶群 (中部) 呈不整合接触, 与下伏麦初箐组呈整合接触; 深部麦初箐组下伏有厚大的攀天阁组火山岩。

综上述, 北厂矿床 L02 线和 L04 线的地层结构表现十分相似, 跑马坪矿床也是如此。其中, 北厂矿床为顶部的 T_{3m} 或 T_{3s} 逆冲于 K_{1j} 之上, 而 K_{1j} 与下伏 T_{3s} (中浅部) 呈不整合接触; 往下为 N_{1j} 与上覆 T_{3s} (中浅部) 呈断层接触, 与下伏 T_{3s} 呈不整合接触; 而 T_{3m} 下伏有 T_{1-2p} 火山岩。而跑马坪矿床为浅部的 T_{3s} 与上覆 N_{1j} (顶部) 呈不整合接触, 与下伏 N_{1j} (中部) 呈断层接触; 中深部 T_{3s} 与上覆 N_{1j} (中部) 呈不整合接触, 深部 T_{3m} 其下伏有 T_{1-2p} 火山岩。整体上看, 北厂

矿床和跑马坪矿床的浅部地层结构有明显差异，即，前者的 T_{3s} 可被 K_1J 和 N_1J 不整合覆盖，后者的 T_{3s} 直接被 N_1J 不整合覆盖，但其中深部地层结构相似。

3.2 控矿断裂的深部延伸特征

以下对北厂和跑马坪矿床内发育的隐伏断（裂）层及已知断（裂）层深部延伸情况的识别和解译进行说明，其它断（裂）层解译结果见图 3 和图 4。

（1）L02 线

L02 线上在北厂和跑马坪共识别 5 条断层，其中近 SN 向 3 条、近 EW 向 2 条（图 3-b~d）。具体如下：

① F_{33} 断层：位于跑马坪东部，控制跑马坪矿床边界。从图 3-a, b 可看出， F_{33} 断面两侧重力值差异、梯度差异明显，同时电阻反应差异也大。结合野外调查和区域布格异常，推测此处为规模较大的断裂， F_{33} 为一条近 SN 向的高角度逆断层，其切深大于 2 km，走向延长超过 6 km；断裂浅部倾向东，但深部可能转为西倾，上下盘地层发育情况见图 3-d。

② F_1 断层：为北厂和跑马坪矿床分界断层。其两侧重力值差异显著，上盘重力值明显增大（图 3-a, b）；由浅至深，该断裂错动电阻率异常带轴线、分隔两中低阻异常带，深部两侧异常等值线疏密突变。结合调查结果分析，该断层为一条近 SN 走向、倾向东的高角度逆断层，推测其倾向延深约 1.0 km，走向延长大于 2.0 km，上下盘地层发育情况见图 3-d。

③ F_{18} 断层：控制北厂矿床西界，并与 F_{20} 断层一起控制北厂矿床边界。其两侧重力梯度发生突变，重力值差异明显。在不同深度，该断层表现出分隔相邻电阻异常带和两侧异常等值线疏密突变现象。结合调查结果分析，该断层为一近 SN 走向、倾向东的高角度逆断层，推测其倾向延深约 1.0 km，走向延长大于 2.0 km，上下盘地层发育情况见图 3-d。

④ SF_4 断层：发育于北厂矿床及其以西区域（图 3-d），浅部呈近 EW 走向，倾向北，倾角约 20°~30°。结合调查结果分析，其为一倾角较缓的走滑-掀斜断层，走向延长超过 2.0 km。断层面上、下盘电阻反应差异明显，上盘电阻为中高阻反应，下盘为低阻反应。地表以下有多个钻孔揭露并控制了该断层，显示断层面上、下盘地层分别为上三叠统和白垩系。

⑤ SF_5 断层：断层在北厂和跑马坪矿床均发育，但仅在北厂矿床南部地表出露，走向近 EW 向，倾向北，为一缓倾的走滑-掀斜断层。结合调查和钻孔揭露，浅部倾角 30°~45°，倾斜延伸方向上可能切穿北厂矿床外围的 F_{j0} 断层上盘。断层在跑马坪被金顶群砂泥岩及第四系沉积物覆盖，但在深部被多个钻孔揭露并控制。断层两侧电阻异常等值线的疏密突变明显，下盘为金顶群砂泥岩，上盘为普遍强烈发育铅锌矿化的三合洞组。该类断层一般控制了铅锌矿（化）体的下界。

此外，还识别了已知的 F_{15} 、 F_{18} 等断层的深部延伸情况（图 3-b），不再详述。

（2）L04 线

L04 线上在北厂和跑马坪共识别 6 条断层，其中近 SN 向 3 条、近 EW 向 2 条、NW 向 1 条（图 4-b~d）。具体如下：

① F_{33} 断层：位于跑马坪东部，控制跑马坪矿床边界，L02 线也对其有控制。从图 4-a, b 可看出，断层上下盘重力梯度变化明显，尤其是深部，同时断层面两侧电阻等值线扭曲及疏密突变现象明显。结合野外调查和区域布格异常，推测其为一近 SN 走向的高角度逆断层，规模较大。该断层断裂切割较深，走向延长超过 6km，两侧产出地层发育情况见图 4-d。

② F_1 断层：为北厂和跑马坪矿床分界断层，L04 线和 L02 线均对其有控制，地表可追踪。两侧重力值差异显著，重力梯度突变强烈，上盘重力值明显增大，为该线重力异常极大值（图 4-a）；在不同深度，该断裂表现出分隔相邻电阻异常带和两侧异常等值线疏密突变现象。结合野外调查，该断层近 SN 走向，倾向东，为一高角度逆断层。倾向延深约 1.0 km，可能仅穿切至深部麦初箐组顶部，走向延长超 2.0 km，两侧地层发育情况见图 4-d。

③ F_{26} 断层：位于北厂矿床西部，NEE 走向，倾向南东，为一陡倾逆断层。其上盘重力值明显增大，重力梯度突变；断层两侧浅部电阻反应差异明显，中深部电阻等值线疏密变化较大。结合

野外调查,推测断层切割深度不大(小于1 km),在北厂矿床走向延长约0.8 km,是否延伸至跑马坪矿区有待进一步查明。

④SF₄ 断层:主要发育于北厂矿床浅部,L04 线和 L02 线均对其有控制。整体走向近 EW,局部发生褶曲,倾向北(图 1-c)。结合调查及钻孔揭露情况看,认为其为一倾角较缓的走滑-掀斜断层,上、下盘地层分别为上三叠统和白垩系。但受浅层干扰因素影响,该断层上、下盘电性、重力差异不明显。

⑤SF₅ 断层:L04 线和 L02 线均对其有控制。在北厂和跑马坪矿床均发育,但仅在北厂矿床南部地表出露,在跑马坪被金顶群砂泥岩及第四系沉积物覆盖,但深部有多个钻孔揭露并控制。结合调查和钻孔揭露情况看,该断层走向近 EW,倾向北,其倾角为 30°~45°,为一倾角相对较缓的走滑-掀斜断层,推测一直向北延深至北厂矿床外围的 F_{j0} 断层。断面两侧为重力异常区、重力等值线和电阻等值线疏密变化明显。其下盘为金顶群砂泥岩,上盘为普遍较强发育铅锌矿化的三合洞组。据地质调查和钻孔系统揭露,该类断层一般控制了铅锌矿(化)体的下界。

⑥PF_{j0} 断层:为一新识别的隐伏断层,位于跑马坪矿床东部。推测其为一走向 NW、倾向 NE 的高角度逆断层,切割深度小于 1 km,走向延长情况不明,为规模不大的次级断层。

除上述断层外,还识别了已知的 F₁₆、F₁₇、F₁₈ 等断层的深部延伸情况(图 4-b),不再累述。

综上述,金顶矿田构造以压缩变形为主,主要表现为以近 SN 向逆断层和近 EW 向走滑-掀斜断层的构造组合样式,同时还发育一系列 NE 和 NW 向次级(走滑)断层。受 EW 向地壳缩短和构造变形的影响,大量新老地层发生变形和相互叠加,造成上三叠统(T_{3s}和 T_{3m})或白垩系(K_{1j}和 K_{2n})或古近系始新统(E_{1y+g})沿断层面被逆冲到新近系中新统金顶群(N_{1j})之上,就形成控矿的地质结构。

4 讨 论

4.1 矿化定位规律

结合上述勘查结果和已开展的地质调查、钻孔及坑道系统编录对金顶铅锌矿田矿化定位规律进行了如下总结。

(1) 地层岩性控矿

已知铅锌矿化受特定的层位及岩性控制特征明显,即矿化普遍赋存于三合洞组(图 2),其 T_{3s}⁴ 砂岩和 T_{3s}² 灰岩、角砾灰岩中分别发育砂岩型矿体(图 5-a, b)和灰岩型矿体(图 5-d, e)。砂岩型矿体通常呈层状顺层产出,几乎全岩矿化,矿化相对较均匀,连续性较好,厚度变化不大。而灰岩型矿体多呈脉状、不规则囊状、局部透镜状产出,矿化多不均匀,连续性较差,厚度变化较大,局部矿体随着地层的变形而发生弯曲(图 2)。

(2) 断裂控矿

矿田内的矿化分布受一系列走向近 S-N、陡倾斜、规模不同的逆断层控制。其中,切割较深规模较大的近 S-N 向逆断层(如 F₁₅、F₃₃)一般控制了矿田边界;而一些切割相对较浅,倾角较陡的逆断层(如, F₁₈、F₂₀)则具体控制着矿床定位(图 3-d、图 4-d)。如断裂 F₃₃ 控制着金顶矿田的东界;断层 F₁₈ 则是西坡和南厂矿床的分界(图 1-c), F₂₀ 断层则是北厂和跑马坪矿床的分界(图 2、图 3-d、图 4-d)。这类具体控制着矿床定位的断层通常上下盘岩性组合的能干性差异较大,变形不均一。具体表现为浅部产状相反的断层,在深部却趋于一致(如, F₂₀ 与 F₃₃ 断裂)。

据钻孔系统编录和开采验证,已知不同规模的矿体普遍发育于逆断层上盘,这类与矿化关系密切的逆断层通常携带三合洞组及其上地层沿断面逆冲至金顶岩砂泥岩(N_{1j})之上,反映出这类逆断层与金顶岩砂泥岩(N_{1j})沉积时期同步或稍晚发育的特征。其中,北厂矿床主要矿体大多数发育于一系列近于平行,近 EW 走向的走滑-掀斜断层上盘(图 3-d),不同的是跑马坪矿床矿化则普遍产出于一系列近乎平行的 NE 向逆断层上盘(图 4-d)。结合野外观察和前期隐伏矿体矿化定位规律研究(薛力鹏等, 2022),这类近于平行的 NW 或 NE 向次级断层,规模虽然较小,但其断

面两侧矿化强烈，应控制着矿化的具体就位（图 5-a）。

（3）不整合面控矿

矿田矿化顶部边界普遍受白垩系与上三叠统、中新统与上三叠统之间的两个沉积不整合界面控制。因所处沉积环境的差异，不同矿床矿化受沉积不整合界面控制作用也不同，如隐伏的架崖山矿床矿化受第三系与上三叠统之间的沉积不整合界面控制较为明显（图 2、图 5-e）；而露天开采的北厂矿床矿化除了受第三系与上三叠统之间的沉积不整合界面控制外，下白垩统与上三叠统之间不整合界面控矿作用更普遍（图 2、图 5-a, b）。

4.2 锌铅矿化与电阻率异常和重力异常关系

（1）铅锌矿化与低电阻反应的关系

据见矿钻孔系统编录和音频大地电磁剖面综合解译，矿田内已知锌铅的矿（化）体普遍位于低电阻反应区边缘的“相对高阻区”，而非异常极值中心区。且低电阻率异常范围在平面上与对应矿体投影位置可以对比，但在深度反应上往往不一致。除局部致矿电阻率异常比对应实际矿化较深（如，L04 线原因有待查证）外，大部分致矿异常区均比实际对应矿化位置较浅（如，L02 线的北厂矿体；图 3-c），即实际矿化埋藏更深。需要注意的是区内不同层位大量发育粉砂质泥质、角砾岩等也具低电阻反应的岩性（表 1），对圈定矿化低阻异常造成了较大干扰。

（2）铅锌矿化与重力异常的关系

水平方向上剩余重力正异常和布格重力极正异常通常能有效指示出矿化位置和形态（如 L02 线，北厂矿床）。其中，跑马坪矿床则是很好地对应了重力负异常指示位置，这可能与矿床内普遍富含厚层的石膏有关，但总体剩余异常仍处于相对高值区（图 3-a, b）。水平重力梯度变化，也能较好指示矿化形态差异，如 L02 线上北厂矿床（尚未被开采部分）的重力梯度为一整体高峰区（图 3-a）；而在 L04 线上则为两个相邻的幅度相对较小的高峰区（北图 4-a），二者中间梯度变化低谷区则正好与采场对应。

垂直方向上，重力异常区指示的矿化深度通常会比实际矿化深度偏浅（图 3-a, b）。当隐伏矿体被开采后产生采空区及回填区时，异常指示的矿化产出形态会与实际不符（图 4-b~d）（如，L04 线，指示北厂矿床总体南西倾，而实际上北东倾）。

综合上述，电法在区分不同岩性组合对电阻率的反应差异有较好的效果，能有效识别低阻空间，但无法有效在低阻空间内进一步分辨和定位矿化空间。重力（正）异常对指示层状、似层状矿化在地表的投影位置效果较好，并可较好反映矿化的形态（图 3-c、图 4-d，如北厂矿床），但反映的矿化埋深比实际要浅，且当普遍富含厚层石膏的金顶群砂泥岩以不整合或断层方式上覆或下伏于赋矿层位（ T_3s ）时，重力探测往往无法有效识别铅锌矿化。因此，在实际应用中，需二者联合使用才能有效识别隐伏的铅锌矿化体。

4.3 构造控矿机制分析

受新生代印度-欧亚大陆斜向碰撞造山的持续挤压作用，兰坪盆地及邻近区域（如，剑川、永平盆地等）经历了多期次的地壳收缩和构造变形事件（廖程, 2021; Yang et al., 2021; Liang et al., 2022）。其中，早期变形发生在古新世之后、始新世之前（60~48 Ma）；而晚期构造形成于渐新世-早中新世（约 25 Ma）并持续至今（Yang et al., 2021）。因此，形成于晚渐新世-早中新世（李小明等, 2000; Wang et al., 2009; Yalikun et al., 2018b; Huang et al., 2022）的金顶铅锌床田与晚期构造事件关系密切。而晚期构造变形主要表现为近 SN 向逆断层+近 EW 向走滑-掀斜断层的组合（Yang et al., 2021; Liang et al., 2022）。因而，这套晚期构造变形组合，与 T_3s^4 砂岩和 T_3s^2 灰岩、角砾灰岩联合控制了区内的铅锌成矿。

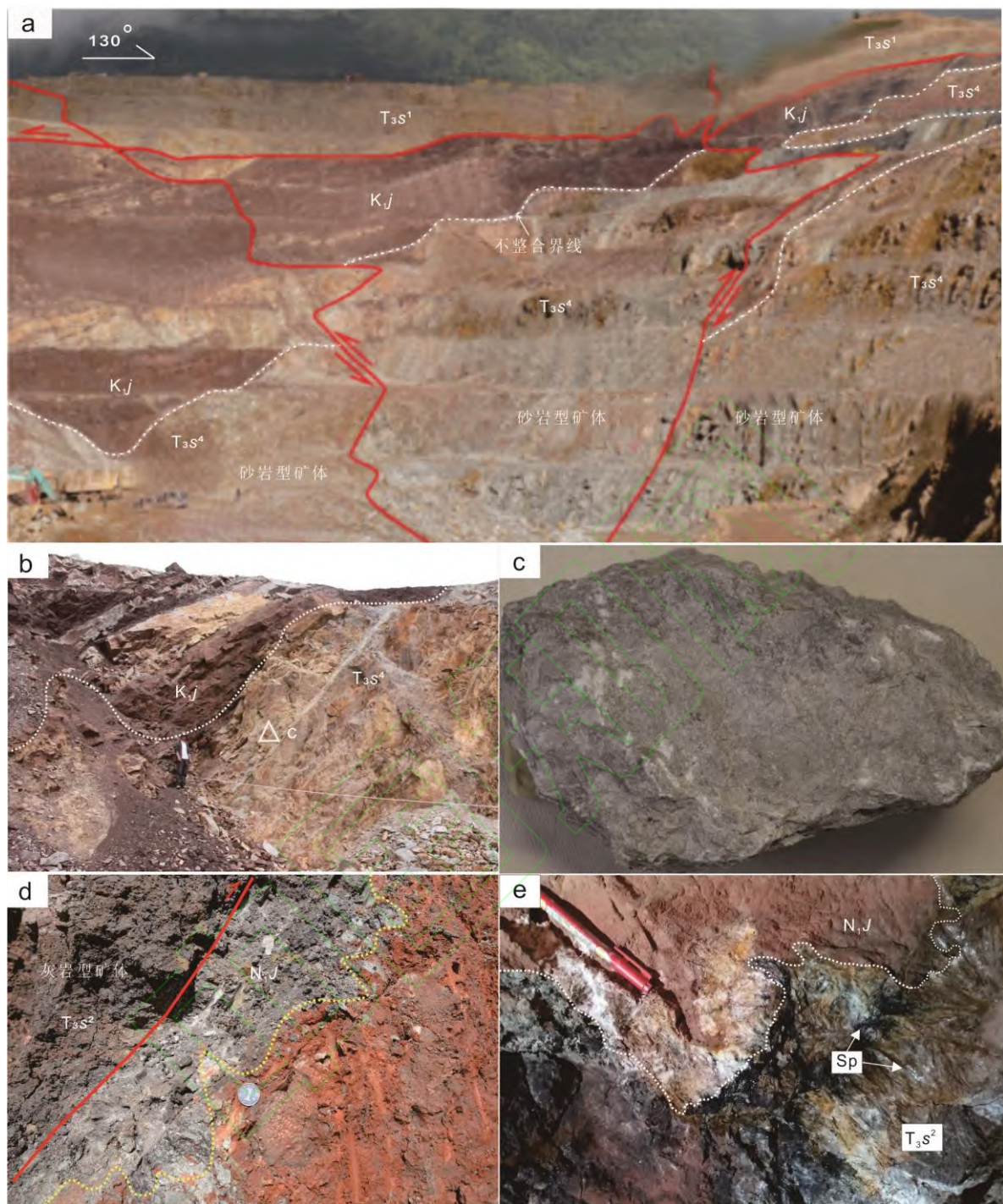


图 5 金顶矿田锌铅矿化定位规律

Fig. 5 Photographs showing the regularity of the distribution of zinc and lead mineralization in the Jinding ore field

a—三合洞组第四段砂岩 (T_{3s^4}) 与上覆景星组 (K_j) 泥岩及粉砂质泥岩呈不整合接触,其内发育砂岩型矿体,矿化顶部通常以不整合面为边界,东北与北西向断层两侧矿化强烈; b—含(泥岩、砂岩)砾粉砂质泥岩不整合于含灰岩角砾石英砂岩之上,稀疏斑点状方铅矿发育于石英砂岩中; c—灰色含(灰岩)砾石英砂岩中稀疏浸染状方铅矿; d—三合洞组灰岩 (T_{3s^2}) 逆冲至红色含石膏砂泥岩 (N_1J) 之上; 断层上盘灰岩中矿化发育, 下盘褪色蚀变发育, 砂泥岩由砖红色褪变成灰色; e—三合洞组 (T_{3s^2}) 灰岩与上覆金顶群 (N_1J) 红色粉砂质泥岩呈不整合接触, 灰岩中大量发育闪锌矿化, 且矿化顶剖通常以不整合面为界。

a—Unconformity between the Jingxing Fm (K_j) (mudstones and silty mudstones) and the 4th member of Sanhedong Fm. (T_{3s^4}) (Sandstones) as well as the orebodies Sandstones. The top of mineralization is usually bounded by the unconformity, with strong mineralization on both sides of northeast and northwest trending faults; b—Gravel bearing silty mudstone (mudstone, sandstone) is unconformable on limestone breccia quartz sandstone, and sparse spotted Galena is developed in quartz sandstone; c—Sparse disseminated Galena in gray gravelly quartz sandstone; d—The limestone of the Sanhedong Formation (T_{3s^2}) is thrust onto the red gypsum bearing sandstone-and-mudstone (N_1J). The mineralization is developed in the limestone of the upper wall of the fault, fading and alteration (sandstone and mudstone fade from brick red to gray) are developed in the lower wall; e—Unconformity between the

overlying Jinding Fm (N_1J) (red sandstone-and-mudstone) and the 2nd member of Sanhedong Fm (T_3s^2) (limestone), the zinc mineralization is developed in the limestone, and the top of the mineralization is usually bounded by the unconformable surface.

从目前矿田的矿床分布和构造配置关系看,这类近 SN 向逆断层控制着矿床分布(图 1-c、图 2、图 3-d、图 4-d)。如,作为跑马坪和北厂矿床分界的 F_{20} 断层,北厂矿床东、西分界的 F_{18} 断层,两侧矿化样式差异明显。这类走向近 SN 向,局部 NE 向(如断层 F_{27} , 图 2)断层本身则无明显矿化,更多起到沟通同位叠置的上三叠统油气藏储层和中新统盆地卤水(带)作用。通常在这类近 SN 向同沉积逆断层空间格架下,同时发育一系列近于平行的 EW 向(跑马坪表现为 NEE 向)的走滑-掀斜断层,并与 SN 向同沉积逆断层连通,断面上也无明显矿化,通常控制着铅锌矿(化)体的底界。近 SN 向逆断层+近 EW 向走滑-掀斜断层的组合构成了矿田的主要构造网络,更多地是承担了流体运移通道的作用,并控制了具体矿床(体)的就位格局(图 1-c、图 3-d、图 4-d)。在矿床范围内,与这类走滑-掀斜断层连通并切穿赋矿层位的 NW 或 NE 向次级断层,则促进了流体运移和卸载速率,具体控制了矿化形态和分布(如跑马坪矿床,薛力鹏等, 2022)。晚渐新世-早中新世,在持续的区域挤压应力作用下,盆地氧化性富含金属元素卤水沿流体运移通道运移至三合洞组灰岩、含灰岩角砾砂岩裂隙带中与富含 H_2S 等还原性流体混合而成矿。

4.4 深边部找矿方向分析

结合上述,金顶矿田中深部(1.0 km 以深)及邻区仍有较大的找矿潜力。确定深部勘查方向时的有利因素:①电阻率低阻区边缘“相对高阻区”;②剩余重力(正)异常高值区;③其上被白垩系或金顶群不整合覆盖的三合洞组灰岩或砂岩地层;④逆断层上盘(尤其是中深以浅范围内)。

根据前文对矿田深部地质结构的解译,结合矿化定位规律和找矿有利因素,本次圈定了 11 处深部找矿靶区,并据其可靠程度进行了分级,具体如下:

(1) A 级靶区:位于已知矿体的走向、倾斜延伸区,及其附近区域有少量工程验证的成矿有利区。本次圈定 A 级靶区 2 处(编号为 A-1 和 A-2)。其中, A-1 位于北厂矿床东北部,其西侧 150 m 处 ZK1304 钻孔对已知矿体的下层已有揭露(图 3-d),该靶区即为其走向延伸方向的成矿有利区。典型低电阻反应($15\sim30\ \Omega\cdot m$, 图 3-c),重力弱正异常区(图 3-b),成矿地质条件与已知矿体(ZK1304 钻孔揭露)十分类型(图 3-d)。A-2 位于跑马坪矿床东北部,其西南侧 250 m 处 ZK418 钻孔对已知矿体已有揭露(图 4-d)。该靶区即为典型低电阻反应($15\sim25\ \Omega\cdot m$, 图 4-c),虽受上覆及下伏厚大金顶群砂泥岩(富含石膏)影响表现为重力弱负异常(图 4-b),但对比西南侧已知矿体(ZK418 钻孔揭露)成矿地质条件,本区仍可圈定为成矿有利区,编号 A-2。

(2) B 级靶区:是据已知矿体产状沿其走向或倾斜方向推测的无工程验证的成矿有利区。本次圈定 B 级靶区 2 处(编号为 B-1 和 B-2)。其中, B-1 靶区位于跑马坪矿床中西部,为 ZK367 揭露的深部矿体(图 2)的走向延伸成矿有利区,典型低电阻反应($15\sim30\ \Omega\cdot m$, 图 4-c),受上覆厚度较大的金顶群砂泥岩及富含石膏影响表现为弱异常(图 4-b),对比该位置浅部已知矿体的地质条件、物探异常特征,推测可能发育铅锌矿体; B-2 靶区位于跑马坪矿床东北部,成矿地质条件、物探异常特征与 B-1 靶区类似。

(3) C 级靶区:既无已知成矿信息、也无工程验证的成矿有利区。本次圈定 C 级找矿靶区 7 处(编号为 C-1~C-7)。其中, C-1 和 C-2 靶区为北厂矿床最深部的矿化层位,典型低电阻反应($15\sim40\ \Omega\cdot m$, 图 3-c、图 4-c)、重力弱正异常区; C-3 靶区为矿田外围的找矿有利区,位于跑马坪矿床东部,矿化埋藏相对较浅。低电阻反应($30\sim60\ \Omega\cdot m$, 图 3-c、图 4-c),重力正异常(图 3-b、图 4-c); C-4~C-7 靶区位于均北厂矿床以西(图 3-d、图 4-d),均为低电阻反应($15\sim30\ \Omega\cdot m$, 图 3-c、4-c),除 C-4 与 C-5 重力弱正异常外,其余均为明显重力正异常(图 3-b、图 4-b)。

5 结 论

(1) 金顶矿田内,电磁法和重力联合探测手段可有效识别深部地质结构和隐伏矿(化)体,能增加找矿预测的有效性。对地层的解译结果与地质实际存在一定偏差,尚需借助勘查工程的揭露进行校正。

(2) 矿田构造组合样式为近 SN 向逆断层和近 EW 向走滑-掀斜断层组合, 还发育一系列 NE 和 NW 向次级(走滑)断层, 以挤压变形为主, 并造成大量新老地层发生变形、相互叠加和逆冲至大量发育的中新统金顶群之上。

(3) 矿田中深部及近外围地区的找矿潜力较大, 地表以下 1.0 km 以深有三合洞组赋矿地层和中新统金顶群大量分布, 是潜在找矿空间。除已知矿体走向及倾斜延深方向外, 跑马坪矿床西侧外围也有较好的找矿前景。本次提出的 11 处深部找矿靶区, 可作为后续勘查工作部署的依据。

致谢: 审稿专家对本文进行认真审查并提出建设性意见, 在此一并深表感谢。

References

- Bai J F, Wang C H, Na R X. 1985. Geological characteristics of the Jinding lead-zinc deposit in Yunnan with a special discussion on its genesis[J]. *Mineral Deposits*, 4(1):1-10 (in Chinese with English abstract).
- Gao L, Wang A J, Liu J L, et al. 2008. Lithologic stratum characteristics of the Jiayashan-Beichang profile of the superlarge Jinding Pb-Zn deposit in the Lanping basin, northwestern Yunnan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(6): 855-865(in Chinese with English abstract).
- Guo F S, Wu Z C, Li X, et al. 2018. The 3D geological modeling of Xiangshan volcanic basin in Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(2/3): 421-434(in Chinese with English abstract).
- Huang S Q, Song Y C, Zhou L M, et al. 2022. Influence of organic matter on Re-Os dating of sulfides: Insight from the giant Jinding sediment-hosted Zn-Pb deposit, China[J]. *Economic Geology*, 117(4): 735-745.
- Kyle J K, Li N. 2002. Jinding: A giant Tertiary sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan, China[J]. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 50: 8-16.
- Lan Q, Hu R Z, Bi X W, et al. 2021. The source of organic matter and its role in producing reduced sulfur for the giant sediment-hosted Jinding zinc-lead deposit, Lanping Basin, Yunnan, southwest China[J]. *Economic Geology*, 116(7): 1537-1560.
- Leach D L, Song Y C and Hou Z Q. 2017. The world-class Jinding Zn-Pb deposit: Ore formation in an evaporite dome, Lanping Basin, Yunnan, China[J]. *Mineral Deposits*, 52: 281-296.
- Li X M, Tan K X, Gong W J, et al. 2000. Study on the metallogenic epoch of the Jinding lead-zinc deposit with apatite fission track analysis[J]. *Geotectonica et Metallogenia* 24(3): 282-286 (in Chinese with English abstract).
- Liang M J. 2016. Filling the Lanping basin: response to the Neotethyan tectonics in the Sanjiang Orogenic belt[D]. PhD Dissertation of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liang M J, Yang T N, Xue C D, et al. 2022. Complete deformation history of the transition zone between oblique and orthogonal collision belts of the SE Tibetan Plateau: Crustal shortening and rotation caused by the indentation of India into Eurasia[J]. *Journal of Structural Geology*, 156: 104545.
- Liao C, Yang T N, Liang M J, et al. 2021. Sedimentary geology of the western margin of the Eocene Jianchuan basin in southeast Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica ET Mineralogica*, 4(40): 729-746(in Chinese with English abstract).
- Lin J Y. 2011. Geophysical model and its application research in Jinding lead-zinc deposit[D]. PhD Dissertation of Central South University (in Chinese with English abstract).
- Liu J L, Wang A J, Zhai Y F, et al. 2009. Structural framework and ore-controlling structures of Jinding super-large lead-zinc deposit in Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1376-1387(in Chinese with English abstract).
- Qiang J K, Wang X Y, Tang J T, et al. 2014. The geological structures along Huainan-Liyang magnetotelluric profile: Constraints from MT data[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 957-965(in Chinese with English abstract).
- Rodi W and Mackie R L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion[J]. *Geophysics*, 66(1): 174-187.
- Song Y C, Hou Z Q, Xue C D, et al. 2020. New mapping of the world-class Jinding Zn-Pb deposit, Lanping basin, southwest China: Genesis of ore host rocks and records of hydrocarbon-rock interaction[J]. *Economic Geology*,

- 115(5): 981–1002.
- Tang Y Y, Bi X W, Fayek M, et al. 2014. Microscale sulfur isotopic compositions of sulfide minerals from the Jinding Zn–Pb deposit, Yunnan Province, southwest China[J]. *Gondwana Research*, 26: 594–607.
- Wang A J, Cao D H, Gao L, et al. 2009. A probe into the genesis of Jinding super-large lead–zinc ore deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(1): 43–54(in Chinese with English abstract).
- Wang G.2021. Upper Crust Structure and Deep Metallogenic Background of Jinding Ore Concentration Area in the Sanjiang area of Yunnan[D]. Master thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Xue C D, Yang T N, et al. 2022.Sedimentary features of the Miocene strata of the Jinding Zn–Pb ore concentration area,SE Tibetan Plateau:Fillings of a peripheral foreland basin in the oblique collision belt[J].*Acta Petrologica Sinica*, 38(11): 3503–3514(in Chinese with English abstract).
- Xu S L,Shao Z G,Li B, et al.2024.Lithospheric electrical structure of western Qaidam Basin[J].*Geological Bulletin of China*, 43(11): 1907–1920.
- Xue C J, Chen Y C, Wang D H, et al. 2003.Geology and isotopic composition of helium, neon, xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, northwest Yunnan, China[J]. *Science in China (Series D)*, 46: 789–800.
- Xue C J, Chi G X, Chen Y C, et al. 2006.Two fluid system in Lanping basin, Yunnan, China-their interaction and implication for mineralization[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 89: 436–439.
- Xue C J, Chi G X and Fayek M. 2015. Micro-textures and in situ sulfur isotopic analysis of spheroidal and zonal sulfides in the giant Jinding Zn–Pb deposit, Yunnan, China: Implications for biogenic process[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 288–304.
- Xue L P,Xue C D,Liu J K, et al. 2022. 3D geological architecture and ore-controlling structures of the Paomaping Zn–Pb deposit at the Jinding ore field, Lanping County, SE Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(11): 3531–3541 (in Chinese with English abstract).
- Yalikun Y, Xue C J, Dai Z J, et al. 2018a. Microbial structures and possible bacterial sulfide fossils in the giant Jinding Zn–Pb deposit, Yunnan, SW–China: Insights into the genesis of Zn–Pb sulfide mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 61–72.
- Yalikun Y, Xue C J and Symons DTA. 2018b. Paleomagnetic age and tectonic constraints on the genesis of the giant Jinding Zn–Pb deposit, Yunnan, Chin[J].*Mineralium Deposita*, 53(2): 245–259.
- Yang T N and Xue C D. 2022.Structural analysis,the geological way of knowing,and development of geosciences:the Cenozoic tectonics of the oblique collision belt, SE Tibet[J].*Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1680–1696 (in Chinese with English abstract).
- Yang T N, Yan Z, Xue C D, et al.2021.India Indenting Eurasia: a brief review and new data from the Yongping basin on the SE Tibtan Plateau[J]. *Geosciences*,11: 518.
- Yu J, Xue C D, Yang T N, et al. 2017. Mineralization resulting from multistage fluids mixing at Paomaping Zn–Pb deposit in Jinding, Lanping basin, northwestern Yunnan Province: Evidence from ore microtextures[J]. *Mineral Deposits*, 36 (2): 391–411 (in Chinese with English abstract).
- Zhou D Q,Cao B B,Li G J, et al. 2015. Prognosis and ore-forming effect of concealed metallogenic pluton in Lanping basin,western Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3466–3476 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白嘉芬,王长怀,纳荣仙.1985.云南金顶锌铅矿床地质特征及成因初探[J].*矿床地质*, 4(4): 1–10.
- 丁文祥,袁峰,李晓晖,等.2018. 基于重磁联合反演的宁芜盆地钟姑矿田深部地质结构解析及成矿预测[J].*地质学报*, 92(11): 2301–2317.

- 高兰,王安建,刘俊来,等.2008.滇西北兰坪地区金顶超大型锌铅矿床架崖山-北厂矿段岩石地层特征[J].地质通报, 27(6): 855-865.
- 李小明,谭凯旋,龚文君,等.2000.利用磷灰石裂变径迹法研究金顶锌铅矿成矿时代[J].大地构造与成矿学, 24(3): 282-286.
- 梁明娟.2016.新特提斯构造演化的沉积记录[D].中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 廖程,杨天南,梁明娟,等.2021.藏东南始新世剑川盆地西缘沉积特征及构造意义[J].岩石矿物学杂志, 40(4): 729-746.
- 林家勇.2011.金顶铅锌矿地球物理模型及其应用研究[D].中南大学博士学位论文.
- 刘俊来,王安建,翟云峰,等.2009.云南金顶超大型锌铅矿区的构造格架与控矿构造问题讨论[J].地质学报, 83(10): 1376-1387.
- 孟银生,张瑞忠,汤磊,等.2022.胶东半壁店隐伏金矿床综合地球物理探测[J].地质通报, 41(6): 1095-1106.
- 强建科,王显莹,汤井田,等.2014.淮南-溧阳大地电磁剖面与地质结构分析[J].岩石学报, 30(4): 957-965.
- 宋玉财,侯增谦,刘英超,等.2017.特提斯域的密西西比河谷型(MVT)锌铅矿床[J].中国地质, 44(4): 664-689.
- 王安建,曹殿华,高兰,等.2009.论云南兰坪金顶超大型锌铅矿床的成因[J].地质学报, 83(1): 43-54.
- 王冠.2021.云南三江金顶矿集区上地壳结构与深部成矿背景[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 王宇,薛传东,杨天南,等.2022.青藏高原东南缘金顶铅锌矿集区中新世沉积特征: 大陆斜向碰撞带周缘前陆盆地沉积[J].岩石学报, 38(11): 3503-3514.
- 徐盛林,邵兆刚,李冰,等.2024.柴达木盆地西部岩石圈电性结构研究[J].地质通报, 43(11): 1907-1920.
- 薛力鹏,薛传东,刘靖坤,等.2022.兰坪金顶跑马坪铅锌矿床的三维地质结构与控矿构造[J].岩石学报, 38(11): 3531-3541.
- 杨天南,薛传东.2022.构造解析、地质学研究范式与理论创新-藏东南侧向碰撞带构造演化研究实践[J].地质学报, 96(5): 1680-1696.
- 余静,薛传东,杨天南,等.2017.兰坪金顶跑马坪铅锌矿床幕式流体混合成矿作用-矿石组构证据[J].矿床地质, 36(2): 391-411.
- 周道卿,曹宝宝,李龚健,等.2015.西南三江兰坪盆地隐伏岩体探测及其成矿效应[J].岩石学报, 31(11): 3466-3476.